呼伦贝尔草原风蚀坑土壤水分异质效应研究

袁立敏[1,2,3]， 杨制国[1,4]， 薛 博[1,2]， 高海燕[1,3]， 韩照日格图[5]

（1. 内蒙古自治区林业科学研究院，内蒙古 呼和浩特 010010；2. 内蒙古多伦浑善达克沙地生态系统国家定位观测研究站，内蒙古 锡林郭勒 027300；3. 内蒙古自治区沙地(沙漠)生态系统与生态工程重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010010；4. 沙地生物资源保护与培育国家林业局重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010010；5. 呼伦贝尔市林业和草原科学研究所，内蒙古 呼伦贝尔 021008）

摘 要：风蚀坑是沙质草原常见的一种风蚀地貌，是草地沙化的一种重要表现形式，其对草原植被破坏性强。本文选择呼伦贝尔草原处于活跃发展阶段的风蚀坑为研究对象，并以周边草地为对照，对风蚀坑内外不同位置、不同深度的土壤含水量进行研究。结果表明：(1) 风蚀坑造成草原土壤水分的“破口”效应，导致其周边近20 m范围草地土壤含水量显著降低，且在沙坑边缘0~3 m范围内形成了一条“干燥带”，其土壤含水量比对照低45.15%；(2) 沙坑内土壤含水量较对照降低44.44%，但沙坑下风向积沙区土壤含水量与对照无显著差异；(3) 风蚀坑的沙坑及积沙区不同深度的土壤含水量异质性较大，变异系数C_V可达到50%以上，且随着土层深度的增加，土壤含水量呈现先增大后减小的趋势；(4) 经过雨季，风蚀坑的积沙区有一定的“储水”作用，而沙坑及边缘区却呈现出严重的“失水”效应，土壤处于极度干燥状态，为沙坑的风蚀扩张提供了条件。

关键词：风蚀坑；土壤侵蚀；土壤含水量；空间尺度；呼伦贝尔草原

风蚀坑是沙质海岸、沙质草原及沙地一种重要的风沙地貌类型[1]，是植被退化与土地沙化的主要发生类型和表现形式[2]。风蚀坑可分为海岸沙地风蚀坑与内陆风蚀坑，我国开展的相关研究主要集中于内陆风蚀坑。内陆风蚀坑可分为平坦草地风蚀坑[3-5]与固定沙丘风蚀坑[6-8]。固定沙丘风蚀坑是沙地的再次活化，相比草地风蚀坑其起伏程度更大、地形更为复杂的特点。草地风蚀坑则是草地流动沙丘形成的起始阶段，相邻多个风蚀坑的发展、相互叠加，促使积沙区集中连片形成沙带[9]，草地景观稳定性及生产力严重下降，并导致草原沙漠化发展。风蚀坑的发生与发展使草原土层结构破坏，下层沙物质掩埋草场，风蚀-沙埋的双重作用及多个相邻风蚀坑扩张与叠加效益，造成草原景观向沙地景观的加速演变[10]。依据风蚀坑的大小、形状与植被情况差异，其发育过程可分为裸地沙斑、活跃发展、固定(消亡)、再活化等演化阶段[10-13]，其中活跃阶段的风蚀-搬运-堆积作用最为强烈，洼地沙坑与沙物质堆积区在草原本底上的组合，在地貌上呈现为槽形、碟形、卵圆形等形状[4,11,14]。不同风蚀坑形状影响其内部风沙流变化，是影响风蚀坑蚀积格局的主要因素，体现了风蚀坑形态与风沙动力间存在耦合关系。众多学者通过野外观测，风洞试验与数值模拟对草地风蚀坑的形成过程[15-17]、形态格局[10-11,18-19]、风沙运动规律[7,20-21]及治理技术[22-26]等方面开展了系统研究，有关风蚀坑土壤性质的相关研究相对较少，并且主要集中于土壤粒度方面的研究[16,27-30]。

土壤水分是影响土壤风蚀过程的关键因子之一[31]，水分含量越小，沙粒易于运动，易发生土壤风蚀[32]。风蚀坑的形成及发育过程与土壤水分变化存在何种联系，风蚀坑究竟对草原的土壤水分产生何种影响？但目前关于风蚀坑土壤水分的研究相对欠缺，导致风蚀坑对草原土壤水分影响的正逆效应不明析。为此，本文选择呼伦贝尔草原处于活跃发展阶段的典型风蚀坑为研究对象，根据地貌特征

收稿日期：2022-03-26； **修订日期：**2022-06-02
基金项目：内蒙古科技计划项目(2022YFDZ0055)；中国科学院“西部之光”项目(2019)
作者简介：袁立敏(1982-)，男，研究员，博士，主要从事荒漠土壤资源利用与保护研究. E-mail: nmgyuanlm@163.com

进行了组成部位划分,并对不同部位及风蚀坑外部的草地不同距离处,1 m土层土壤进行了含水量测定,旨在为厘清风蚀坑自身水分空间分布特征及其对草原土壤水分的影响,为风蚀坑发育驱动力研究及风蚀治理提供依据。

1　研究区概况与方法

1.1　研究区概况

呼伦贝尔沙地(117°12′~121°10′E,47°20′~49°50′N)位于呼伦贝尔草原腹地,主要由4条明显的沙带组成,分别是位于海拉尔河沿岸的沙带,由固定、半固定沙丘为主,并存在部分流动沙丘及风蚀坑(图1);中部苏敏诺日古道、滚诺尔等古河道分布沙带,主要以新月形沙丘链为主;南部以呼和诺尔为界,沙带分为东西两部分,以沙丘链为主;东南部伊敏河沿岸分布的沙带,分布有大量流动沙丘,形成比较晚,属于现代风成沙丘[33]。各种形状的风蚀坑在各个沙带均有分布,且多处于沙带边缘、平缓草地及起伏沙地[34]。

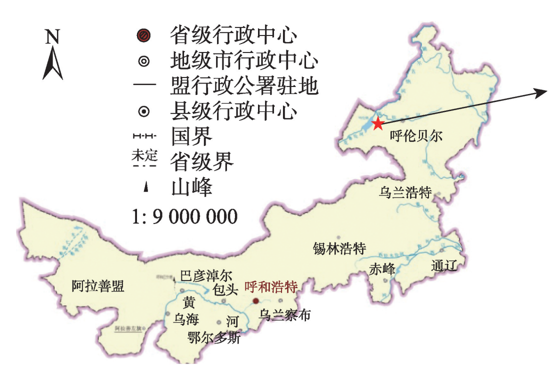
呼伦贝尔沙地地处呼伦贝尔草原,该区属温带半干旱草原气候,1961—2017年干燥度呈现上升趋势,以干旱性气候为主[35]。年均气温-2.5~0 ℃,极端高温36.6 ℃,极端低温-42.3 ℃;≥0 ℃年积温1790~2820 ℃,≥10 ℃年积温约1235~2413 ℃,无霜期为102.4 d;年均降水量353.7 mm,年均潜在蒸发量1217.6 mm。该区盛行西南风、西风,平均风速约3.2 $m\cdot s^{-1}$,最大风速可达20 $m\cdot s^{-1}$,春季平均风速可达4 $m\cdot s^{-1}$,全年8级以上大风日数≥26 d。沙地土壤以风沙土为主,草地土壤为沙质栗钙土,钙积层多分布于10~30 cm范围,其下为海拉尔组河湖相沙。呼伦贝尔草原野生牧草可达794种,隶属48科、222属,菊科是野生饲用植物的主要组成[36]。沙化草地天然地带性优势植物主要为羊草(*Leymus chinensis*)、大针茅(*Stipa grandis*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)等。沙丘主要以小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、山刺玫(*Rosa davurica*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、黄柳(*Salixgordejevii*)等灌丛群落为主,并伴有沙蓬(*Agriophyllum squarrosum.*)、烛台虫实(*Corispermum candelabrum*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、狗尾草(*Setaria viridis*)等[37]。

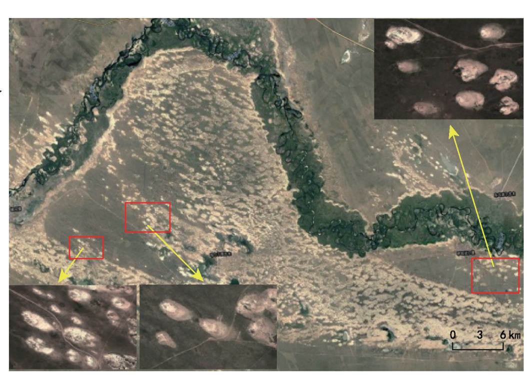
1.2　风蚀坑部位划分

风蚀坑是典型的风蚀-堆积地貌,根据地形、土壤类型及植被差异,采用人员踏查结合无人机影像识别的方法,将风蚀坑由内向外分为:Ⅰ沙坑、Ⅱ边缘带、Ⅲ重度积沙区、Ⅳ轻度覆沙区、Ⅴ沙-草过渡区5个典型部位。野外调查发现,坑外积沙区分为:重度积沙区、轻度覆沙区、沙-草过渡区,其中,重度积沙区基本无植物生长,轻度覆沙区有零星植物生长,沙-草过渡区有大量的植物生长,且植被种类组成显著区别于轻度覆沙区及周边草地[33],区域植被覆盖明显不同(图2a)。在研究区选择处于活化阶段[4,11]的风蚀坑,尽量选择孤立分布、相邻风蚀坑无接壤、无叠加的风蚀坑。无人机在距地表100 m高度处实时影像反馈,并结合人为踏查的方法,确定风蚀坑各区域的边界,同时采用RTK在风蚀坑各区域边界采集点,完成风蚀坑分区及各区域面积计算,在研究区共测量风蚀坑22个。

1.3　土壤含水量测定

在研究区选取5个西北走向、独立分布的风蚀





注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2019)3333号,对底图边界无修改。

图1　研究区位置及风蚀坑分布特征

Fig. 1　Location and distribution characteristics of blowouts in the study area

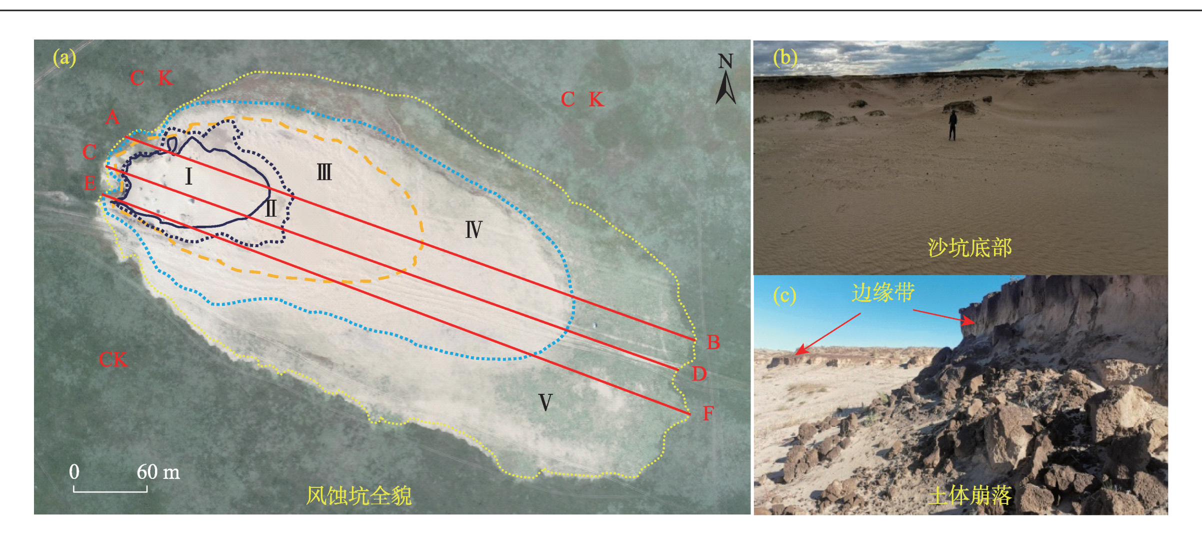


图2 风蚀坑土壤取样位置及局部地貌特征

Fig. 2 Sampling locations and local geomorphic features of blowout

坑(表1),并按照风蚀坑发展方向选择5个断面进行土壤取样(图2a):沿BA、DC、FE 3条样线自沙坑内边缘开始向上风向周边草地取样,取样间隔0.1 m、0.5 m、1.0 m、10 m、20 m、50 m,每个风蚀坑共18个点;同时沿AB、CD、EF 3条样线在风蚀坑Ⅰ、Ⅱ区域随机设置取样点,自沙坑下风向内边缘处开始每隔50 m等间距设置取样点,共24个点;在风蚀坑上风向,周边无影响草地处随机设置取样点,作为对照CK。于2019年9月中旬,利用土钻在各样点取0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm土层土样,每个取样点3个重复,采用烘干法测定土壤水分。本研究采样时段处于植物生长末期,夏季降雨补给基本结束,也是风季的开始时间,此时段的土壤水分特征能够反映出风蚀坑经历雨季土壤水分恢复状况,也能够反映风季风蚀坑表层土壤风蚀潜质,在一定程度上能够表现出风蚀坑水分异质性。

1.4 数据分析

利用Excel 2007进行数据处理及图表绘制,Surfer 8.8绘制等值线图,SAS 9.2进行方差分析等统计分析。

2 结果与分析

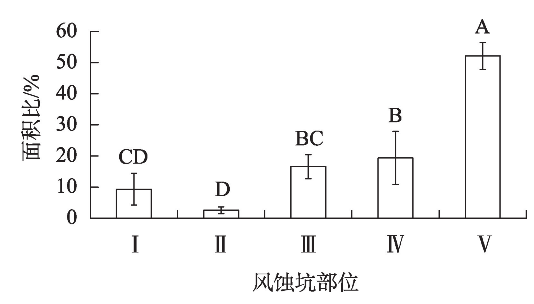
2.1 风蚀坑典型部位分异特征

将5个供试风蚀坑不同部位面积数据进行平均得到图3。风蚀坑多由凹陷沙坑及沙物质堆积区两部分组成[38],处于活跃发展阶段、固定阶段的风蚀坑可分为5个典型部位,且各部位分异显著。根据风蚀坑各区域地形特征、土壤类型及植被覆盖,将风蚀坑由内向外分为Ⅰ沙坑、Ⅱ边缘带、Ⅲ重度积沙区、Ⅳ轻度覆沙区、Ⅴ沙-草过渡区5个典型部位,且各部位面积差异较明显,Ⅰ沙坑坑口最大面积仅占风蚀坑总面积的9.32%,仅Ⅴ沙-草过渡区面积可达风蚀坑总面积的52.18%。风蚀坑形成的积沙区(Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ区)面积占到风蚀坑总面积的88.11%,换而言之,风蚀坑绝大部分区域处于沙物质堆积状态,沙埋导致草地植被退化的范围远远超出了沙坑

表1 风蚀坑参数特征

Tab. 1 Morphological parameters of blowouts

风蚀坑编号	沙坑面积/hm^2	沙坑最大深度/m	沙坑宽度/m	沙坑长度/m	风蚀坑面积/hm^2
1号	0.82	6.65	96.96	153.68	13.47
2号	1.02	10.25	109.61	188.18	21.72
3号	0.88	5.52	103.43	128.66	14.46
4号	0.65	7.78	60.92	101.65	4.57
5号	1.04	15.36	88.62	210.76	6.71



注：不同大写字母表示在$P<0.05$水平上风蚀坑不同部位面积比差异显著。

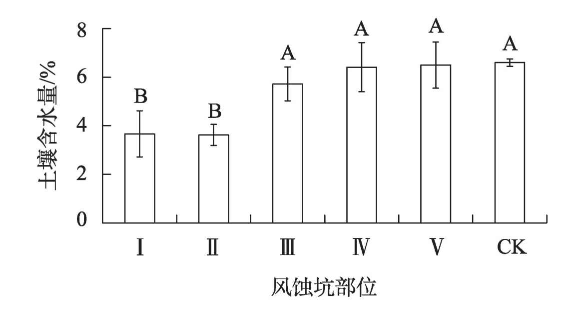
图3 风蚀坑典型部位面积占总面积的百分比

Fig. 3 Percentage of the area of each typical part in the total area of blowouts

自身范围。

2.2 风蚀坑各部位土壤水分特征

图4是5个风蚀坑不同部位的0~100 cm土层土壤含水量平均值。整体对比来看，风蚀坑的Ⅰ沙坑、Ⅱ边缘带2个典型区域土壤含水量较低，均在4%以下，较对照草地(CK)分别降低了44.44%、45.15%，而3个积沙区(Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ区)与CK无显著差异。沙坑土壤含水量显著低于积沙区，达36.72%。积沙区虽然是由干燥的沙物质堆积而成，但是土壤含水量与未沙化草地接近，说明在经过雨季后，该区域土壤水分得到一定程度的补充，风沙土对过量的水分形成快速下渗，但是被下层沙埋的草地原始地表土层阻挡，有效的保持了下渗的水分。



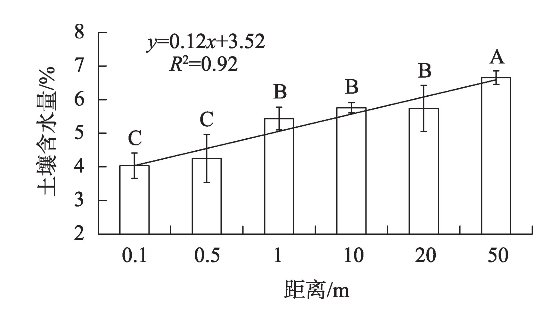
注：不同大写字母表示在$P<0.05$水平上风蚀坑不同部位土壤含水量差异显著。

图4 风蚀坑及外部草地土壤含水量

Fig. 4 Soil moisture content of blowouts and external grassland

2.3 风蚀坑对周边草地土壤水分的影响

调查Ⅰ沙坑上风向及两侧边缘至草地50 m范围内，1 m深度土壤含水量(图5)。由Ⅱ边缘带至周边草地，土壤含水量呈线性增加趋势($P<0.05$)。风蚀坑沙坑底部向下发展过程中，地下水位也随之下



注：不同大写字母表示在$P<0.05$水平上风蚀坑边缘向外不同距离处土壤含水量变化差异显著。

图5 风蚀坑边缘向外不同距离处土壤含水量变化

Fig. 5 Variation of soil water content at different distances outward from the edge of blowouts

移变迁[10]，也对其侧向的周边草地土壤含水量产生一定的影响。在地下水的纵向变化过程中，风蚀坑对周边草地土壤含水量也产生了显著影响，与风蚀坑距离越近，土壤含水量越低；与之越远，土壤含水量逐渐增大。在边缘带的内部边缘0~1 m范围内，土壤含水量降低程度最大，这部分区域处于边缘带(约0~3 m)范围内；其次为1~20 m范围，这部分区域处于覆沙区(约3~10 m)、沙-草过渡区(10~30 m)范围内；至50 m处时，属于无积沙草地(>35 m)范围，土壤含水量与CK逐渐接近。

2.4 风蚀坑积沙区土壤水分变化特征

Ⅰ沙坑下风向内侧边缘至外部草地，依次经历Ⅱ边缘带、Ⅲ重度积沙区、Ⅳ轻度覆沙区、Ⅴ沙-草过渡区5个典型部位。从图6可以看出，整个研究区域可以分为4个区域(A、B、C、D)。区域A出现在距离沙坑内边缘至2.3 m处浅层土壤，约0~0.3 m深度范围土层，土壤含水量低于4%，该区土壤含水量平均值为2.5%；位于沙坑内侧壁0~0.3 m距离范围的B区域与远离沙坑的C区域，土壤含水量在3.5%~5.5%之间，B区域表层和侧壁土壤均为栗钙土，水分补给困难，且大部分空间裸露，表层及侧边土壤水分散失严重，通过侧向毛管造成深处水分散失，可影响至距离侧边0.4 m范围，此区域长期处于干燥状态，下层极易发生风蚀，造成上部侧壁崩塌；较深层的D区域，土壤含水量相对较高，处于6.5%~10.5%，基本在CK(6.67%)以上，且主要分布在30 cm土层以下，并且随着与沙坑距离的增加，干燥的土层越来越浅、越来越薄。也进一步说明了适度的覆沙有助于提高草地的土壤含水量，沙层可以使降水形成有效入渗，同时易形成干沙层抑制水分散失。

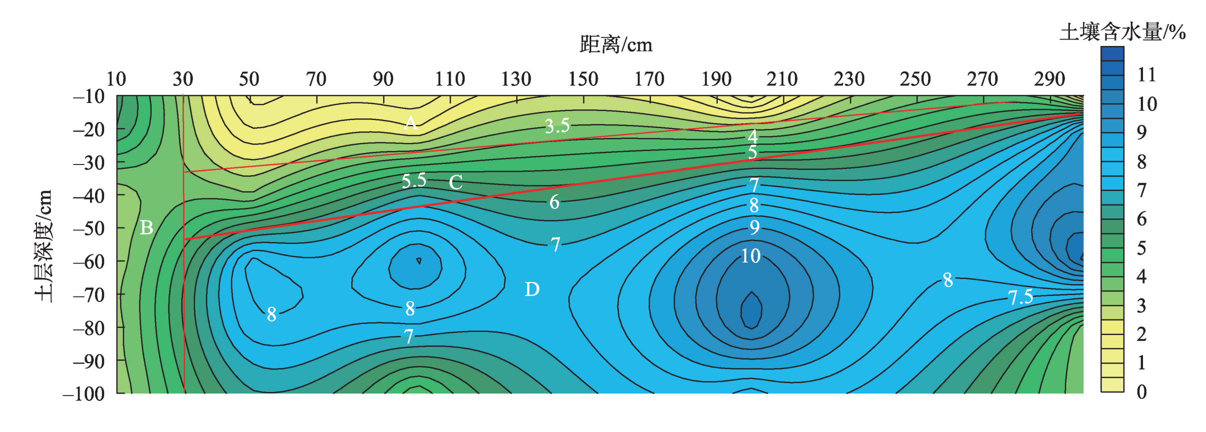


图6 距离风蚀坑边缘向外不同距离处土壤含水量等值线

Fig. 6 Soil moisture contour map of different distances outward from the edge of blowouts

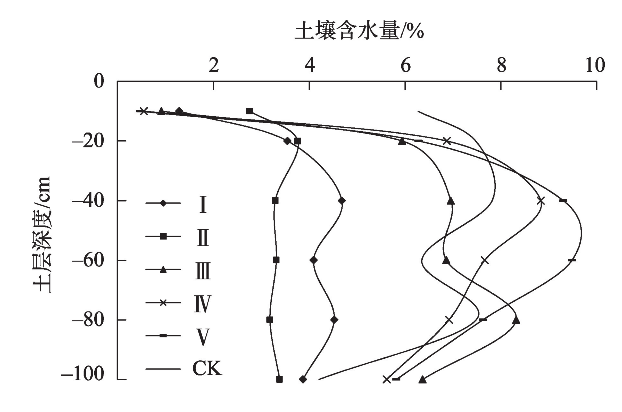


图7 风蚀坑典型部位剖面土壤含水量

Fig. 7 Soil moisture content in typical sections of blowouts

2.5 土壤水分随着土层深度变化特征

由图7可知,风蚀坑5个典型部位中,除了边缘带外,其他4个部位及CK均出现随着土层深度的增加土壤含水量先增大后减小的趋势。Ⅲ重度积沙区、Ⅳ轻度覆沙区、Ⅴ沙-草过渡区0~10 cm表层土壤含水量均低于1%,随着土层深度的逐渐增加,3个区域土壤含水量呈现先增加后降低,在40~80 cm土层含水量较高,与CK存在显著差异。

沙-草过渡区虽有植物生长,但其各层土壤含水量变化趋势与重度积沙区、轻度覆沙区无显著差异,说明残存的植物并未对深层土壤水分产生显著影响。沙坑土壤含水量随土层深度的增加也呈先增加后降低的趋势,主要是由于沙坑土壤均是由海拉尔组散沙层,长期的风蚀分选,表层土壤粒径粗化严重,土壤持水能力大大降低,整个土层土壤含水量均低于CK。边缘带表层剥蚀严重,整个供试土层均为原始土层,土壤结构变化相对较小。其0~10 cm土层土壤含水量(4.06%)显著高于其他4个区域,但是显著低于CK,可能是由于毛细作用或冷凝水作用所致。

3 讨 论

风蚀坑在形成和发育过程中,草地原有的地带性土壤结构遭到了破坏,凹陷沙坑失去了栗钙土层保护,风蚀下陷及向边缘扩张程度加强,沙坑边缘草原植被退化,母质土壤裸露,边缘崩落、磨蚀频发,下风向沙物质不断堆积,在较高处形成明显的沙脊线,逐渐向后方推进,掩埋大面积草地,形成了轻度覆沙区。同时,进入空气中的沙物质由于地形变低缓,而坠落在更远处的草地,则形成了沙-草过渡区域。本研究中涉及的风蚀坑是其扩张发展最为活跃的阶段[4],沙坑内存在风蚀残丘痕迹,沙波纹明显,地表粗沙粒较厚,最低处零星分布沙生植物;边缘带位于沙坑边缘区域,崩落、磨蚀严重,侧边底部风蚀导致上部土体坍塌,大小不均的土块散落在沙坑内侧边坡[10],在沙坑边缘顶部地表栗钙土层裸露,植被稀少,地表具有显著的磨蚀痕迹;沙物质堆积区按照堆积程度及植被盖度不同分为3个区域,重度积沙区主要分布在风蚀坑下风向及两侧,该区域基本无植物生长,一般沙坑的上风向的边缘无重度积沙或面积甚微;轻度覆沙区沙物质堆积厚度相对较小,该区域有植物出现,但长势较差、盖度较低,与重度积沙区交界向外植被分布具有一定的规律性[34];沙-草过渡区地势开阔平坦,有明显的覆沙,但覆沙厚度一般<12~15 cm,该区域生长着草地原生植物,且植物种类丰富度高于周边草地[33],但是,植物长势减弱,并且草场依然存在沙埋威胁。

风蚀坑5部位中,边缘带占风蚀坑总面积比最小,仅为2.57%,但是该部位是风蚀坑向草地横向扩张的起始部位,同时也制约着沙坑的纵向发展。该部位土壤与其他部位相比最为干燥,含水量仅为CK的54.86%,含水量偏低将会增大土壤的可蚀性[31],说明此阶段的风蚀坑存在较高的风蚀风险。边缘带是草地与沙坑的过渡区,由栗钙土组成,质地较细、土质坚硬,降水较大时不能有效入渗,易形成地表径流,径流运动在栗钙土层表面也会产生大量的侵蚀沟。与此同时,径流沿着侧壁向沙坑运动,也会造成侧壁侵蚀沟发育。复杂的地形会对过境气流产生更为强烈的扰动作用,直接对地表作用的湍流增多、增强,加之进入风蚀坑的气流受到侧壁地形的抬升作用会加强,并发生转向、分离、翻转及更加复杂的三维运动[39],而侧壁的侵蚀沟则是下一步风蚀的"突破口",气流将在侵蚀沟内汇聚,发生强烈的掏蚀作用,加速侧壁崩塌,此侵蚀特征,也可能是导致风蚀坑形态差异的主要影响因素[40]。强烈的气流作用也会加速地表水分的散失,对风蚀作用产生正向反馈。

边缘带顶部及侧壁均裸露在空气中,该区域风沙湍流最为强烈,边缘带顶部多发生地表径流,大部分地表径流进入沙坑内,但是并未造成沙坑土壤水分的增加。由于沙坑土壤是海拉尔组河湖相沉积物,黏粒、粉粒缺乏,加之长期的风沙活动导致土壤颗粒粗化严重,多以粗砂为主[29],难以保持水分,降雨及边缘带形成的径流在此区均会快速的向更深层下渗。重度积沙区、轻度覆区、沙-草过渡区土壤含水量C_V均达到50%以上(图7),变异程度最大,不难看出,此3个区域土层土壤组成差异较大,剖面结构由上至下可分为风成沙、古土壤、风成沙、下伏古土壤、下伏河湖相沙等土层[16],风成沙保水性差,在无降水条件下,表层易形成干沙层,土壤含水量维持在田间持水量以下,并且受到反向气流作用,加速地表蒸腾,造成表层土壤极度干燥。重度积沙区0~1 m土层完全由风积沙组成的重度积沙区,其整体含水量偏低,而轻度覆沙区及沙-草过渡区表层较低,向下土层含水量较高,与土层土壤类型相关。轻度覆沙区及沙-草过渡区浅层为风积沙,下层由栗钙土组成,风积沙层是在强烈的风沙活动条件下,由极度干燥的沙物质组成,主要来源于沙坑,在充足降水补给条件下,3个积沙区域水分均能够得到有效恢复,干燥的沙物质更易吸水,饱和后可形成有效入渗,而下层的栗钙土层又对入渗起到了"拦截"作用,大大降低了水分向更深层的入渗。并且风积沙物质易形成干沙层,可有效阻挡水分的蒸发散失。

土壤水分直接受到气候、植被、土壤类型、地貌地形及人类活动等诸多因素干扰,而植被是草地土壤浅层水分变异的直接影响者。植被生长旺盛,其根系必然发达,土壤水分的利用也会增强,在一定程度上可减缓土壤水分的运移,亦可增强土壤储水能力[41]。风蚀坑的形成造成营养土流失与风沙土裸露,直接导致该处草地植被消失,而大面积的沙埋也导致了更大面积的草地植被退化,随着积沙厚度变薄,小群落优势种呈现带状更替分布[42]。植被的消失,减少了土壤水分消耗,但是也同样丧失了根系的储水作用。本研究发现,风蚀坑在发展过程中,造成了草原土壤水分的大量散失,具有一定的"破口"效应,风蚀坑对沙坑上风向及两侧草地土壤含水量的影响范围可延伸至沙-草过渡区,至少可造成周边近20 m范围内土壤含水量显著降低。同时,干燥的沙物质经过风蚀-搬运-堆积作用,在重度积沙区、轻度覆沙区也是干燥的,干燥沙物质反向吸收掩埋的原始土壤水分,并且此区域基本无植物生长,此双重叠加作用是导致与周边草地土壤水分差异的主要原因。而在沙-草过渡区,植被数量逐渐增加,流沙活动逐渐消失,土壤水分变化也与周边草地逐渐一致。风蚀坑不同部位存在风蚀、沙埋等不同的风沙过程,导致与原生草地的生态环境截然不同,诸多因素的综合作用下,导致风蚀坑5个典型部位水分存在异质性。进一步分析,风蚀坑形成大面积流沙,裸露沙面代替了植被覆盖,降低了植被对水分的损耗,同时大大降低了地表径流产生,干沙层有效锁住深层水分,那么在有效降雨补给下,风蚀坑是否会对草原深层水分的增加产生正向效益?本研究仅针对于浅层土壤水分开展了研究,建议下一步扩大土层深度尺度,以探讨风蚀坑与草原土壤水分的关系。

4　结 论

(1) 处于活跃发展阶段,沙质草原风蚀坑风蚀-堆积地貌分异显著,并可以划分为沙坑、边缘带、重度积沙区、轻度覆沙区、沙-草过渡区5个典型部

位。风蚀坑形成的积沙面积占到风蚀坑总面积的88.11%,仅沙-草过渡区覆盖面积可达风蚀坑总面积的52.18%,沙坑最大横截面面积仅占总面积的9.32%。

(2) 风蚀坑沙坑、边缘带2个部位的土壤含水量显著低于对照草地,分别降低了44.44%和45.15%;重度积沙区、轻度覆沙区、沙-草过渡区土壤含水量降低程度不显著,但是各土层土壤含水量变异程度较大,C_V达到50%以上,沙坑C_V达到了35.86%,边缘带C_V(19.14%),与对照草地(22.94%)无显著差异。

(3) 风蚀坑对草原产生了显著的"破口"效应,风蚀坑对周边草地土壤水分产生了显著影响,在边缘带区域形成了一条0~3 m宽的"干燥带",其土壤含水量比对照降低了45.15%,并且随着与风蚀坑边缘距离的增加,土壤含水量降低程度减弱,其显著影响范围可至距离边缘20 m外。

(4) 经过雨季降水补给,风蚀坑沙物质堆积区域能够实现一定的"储水"作用,且沙-草过渡区及轻度覆沙区最为显著。沙坑及边缘带存在严重的"失水"效应,土壤处于干燥状态,为冬春季风蚀坑风蚀扩张及形态发育提供了条件。

参考文献(References):

[1] 庄燕美, 哈斯. 沙丘风蚀坑的形态及动力过程的研究进展[J]. 干旱区地理, 2005, 28(5): 632-637. [Zhuang Yanmei, Ha Si. Progress of the study on shapes and dynamical process of blowouts on dunes[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(5): 632-637.]

[2] 朱震达, 陈广庭. 中国土地沙质荒漠化[M]. 北京: 科学出版社, 1994. [Zhu Zhenda, Chen Guangting. Sandy Desertification in China[M]. Beijing: Science Press, 1994.]

[3] 孙禹, 杜会石, 刘美萍, 等. 风蚀坑形态-动力学研究进展[J]. 地理科学, 2015, 35(7): 898-904. [Sun Yu, Du Huishi, Liu Meiping, et al. A review on morphodynamic processes of blowouts[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(7): 898-904.]

[4] 张德平, 王效科, 哈斯, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑研究(1)-形态、分类、研究意义[J]. 中国沙漠, 2006, 26(6): 894-902. [Zhang Deping, Wang Xiaoke, Ha Si, et al. HulunBuir sandy grassland blowouts(I): Geomorphology, classification, and significances[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(6): 894-902.]

[5] Sun Yu, Hasi Eerdun, Liu Meiping, et al. Airflow and sediment movement within an inland blowout in HulunBuir sandy grassland, Inner Mongolia, China[J]. Aeolian Research, 2016, 22: 13-22.

[6] 闫德仁. 浑善达克沙地风蚀坑形态特征及其影响因素[J]. 地理科学, 2016, 36(4): 637-642. [Yan Deren. Impact factors and morphological characteristics of blowouts in Hunshandake sand land[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(4): 637-642.]

[7] 孙禹, 杜会石, 哈斯额尔敦, 等. 固定沙丘风蚀坑风沙动力学观测研究[J]. 地理学报, 2016, 71(9): 1562-1570. [Sun Yu, Du Huishi, Hasi Eerdun, et al. Aeolian dynamical process of blowout on the fixed dune[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(9): 1562-1570.]

[8] 胡日娜, 哈斯额尔敦, 浩毕斯哈拉图, 等. 浑善达克沙地东南缘固定沙丘风蚀坑动态变化[J]. 中国沙漠, 2019, 39(1): 34-43. [Hurina, Hasi Eerdun, Haobisi Halatu, et al. Dynamic change s of blowouts on fixed sand dunes in the southeastern fringe of Otindag Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(1): 34-43.]

[9] Malakouti M J, Lewis D T, Stubbendieck J. Effect of grasses and soil properties on wind erosion in sand blowouts[J]. Journal of Range Management, 1978, 31(6): 417-420

[10] 张德平, 孙宏伟, 王效科, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑研究(Ⅱ): 发育过程[J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 20-24, 170-171. [Zhang Deping, Sun Hongwei, Wang Xiaoke, et al. HulunBuir sandy grassland blowouts(II): Process of development and landscape evolution[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(1): 20-24, 170-171.]

[11] 阎旭, 张德平, 夏显东, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑形态发育模式分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(2): 212-217. [Yan Xu, Zhang Deping, Xia Xiandong, et al. Morphology and development model of blowouts in HulunBuir sandy grassland, China[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(2): 212-217.]

[12] Jungerius P D. A simulation model of blowout development[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1984, 9: 509-512.

[13] Gares P A, Nordstrom K F. A cyclic model of foredune blowout evolution f or a leeward coast: Island Beach, NJ[J]. Annals of the Association of American Geographers, 1995, 85: 1-20.

[14] Hesp P A, Walker I J. Three-dimensional aeolian dynamics within a bowl blowout during offshore winds: Greenwich Dunes, Prince Edward Island,Canada[J]. Aeolian Research, 2011, 3: 389-399

[15] 张德平, 王效科, 孙宏伟, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑研究(Ⅳ)——人类活动的影响[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 214-220. [Zhang Deping, Wang Xiaoke, Sun Hongwei, et al. HulunBuir sandy grassland blowouts: Influence of human activities[J]. Journal of Desert Research, 2017, 27(2): 214-220.]

[16] 周炎广, 陈惠中, 管超, 等. 呼伦贝尔沙地风蚀坑粒度特征及其环境意义[J]. 中国沙漠, 2018, 38(4): 724-733. [Zhou Yanguang, Chen Huizhong, Guan Chao, et al. Grain size characteristics of the blowout and its environmental significance in the HulunBuir Sandy Land China[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(4): 724-733.]

[17] Du H S, Hasi E, Yang Y, et al. Landscape pattern change and driving force of blowout distribution in the HulunBuir Sandy Grassland[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2012, 4(5): 431-438.

[18] Smyth T A G, Jackson D W T, Cooper J A G. High resolution mea-

sured and modelled three-dimensional airflow over a coastal bowl blowout[J]. Geomorphology, 2012, 177-178: 62-73.

[19] 王帅, 哈斯. 呼伦贝尔沙质草原区域风况及风蚀坑形态特征[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 74-76. [Wang Shuai, Ha Si. Wind regime and blowouts geomorphology in HulunBuir sandy grassland [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 15(3): 74-76.]

[20] 李双权, 哈斯, 杜会石, 等. 沙质草地碟形风蚀坑形态-气流相互作用[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1201-1209. [Li Shuangquan, Ha Si, Du Huishi, et al. Interaction between airflow and shape of saucer blowout in sandy grassland[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(5): 1201-1209.]

[21] 王帅, 哈斯, 张军, 等. 呼伦贝尔沙质草原槽形风蚀坑表面气流及其意义[J]. 中国沙漠, 2007, 27(5): 745-749. [Wang Shuai, Ha Si, Zhang Jun, et al. Geomorphological significance of air flow over saucer blowout of the HulunBuir sandy grassland[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(5): 745-749.]

[22] 薛博, 袁立敏, 黄海广, 等. 沙障对风蚀坑种子库特征的影响研究[J]. 内蒙古林业科技, 2020, 46(3): 13-18. [Xue Bo, Yuan Limin, Huang Haiguang, et al. Effects of sand barriers on characteristics of seed bank in blowout[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science & Technology, 2020, 46(3): 13-18.]

[23] 曲娜, 杜敏, 袁立敏, 等. 呼伦贝尔沙化风蚀坑生物工程治沙技术效果[J]. 内蒙古林业科技, 2013, 39(2): 25-27, 46. [Qu Na, Du Min, Yuan Limin, et al. Effect of biological engineering on sand control in blowouts of HulunBuir[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science & Technology, 2013, 39(2): 25-27, 46.]

[24] 曲娜, 闫婷, 黄海广, 等. 活化风蚀坑沙障固沙技术及植被恢复[J]. 内蒙古林业科技, 2020, 46(1): 1-7. [Qu Na, Yan Ting, Huang Haiguang, et al. Sand fixation technology and vegetation restoration of activated blowouts sand barrier[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science & Technology, 2020, 46(1): 1-7.]

[25] 黄海广, 闫德仁, 胡小龙, 等. 浑善达克沙地固定沙丘活化风蚀坑治理技术[J]. 内蒙古林业科技, 2018, 44(4): 18-24. [Huang Haiguang, Yan Deren, Hu Xiaolong, et al. Treatment technology of fixed dune activated blowouts in Otindag Sandy Land[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science & Technology, 2018, 44(4): 18-24.]

[26] 闫德仁, 黄海广, 胡小龙, 等. 风蚀坑土壤风蚀控制与植被恢复技术[J]. 内蒙古林业科技, 2019, 45(1): 1-4, 33. [Yan Deren, Huang Haiguang, Hu Xiaolong, et al. Techniques of soil wind erosion control and vegetation restoration in blowouts[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science & Technology, 2019, 45(1): 1-4, 33.]

[27] 徐汝汝, 安庆, 赵启, 等. 柴达木盆地东缘风蚀坑不同位置风成沉积物粒度特征分析[J]. 成都师范学院学报, 2019, 35(9): 91-97. [Xu Ruru, An Qing, Zhao Qi, et al. Grain size characteristics of aeolian sediments at different location of blowouts in the eastern margin of Qaidam Basin[J]. Journal of Chengdu Normal University, 2019, 35(9): 91-97.]

[28] Fraser G S, Bennett S W, Olyphant, et al. Windflaw circulation patterns in a coastal dune blowout[J]. Journal of Coastal Research, 1998, 14(2): 451-460.

[29] 张惜伟, 汪季, 高永, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑表层土壤粒度特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 293-299. [Zhang Xiwei, Wang Ji, Gao Yong, et al. Characteristics of surface soil grain size in wind erosion pits in HulunBuir Sandy grassland[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 293-299.]

[30] 王中原, 罗万银, 董治宝, 等. 共和盆地高寒草原风蚀坑表层沉积物粒度特征及动力学意义[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 7-16. [Wang Zhongyuan, Luo Wanyin, Dong Zhibao, et al. Grain size characteristics and dynamic significance of surface sediments in blowouts of alpine steppe in Gonghe Basin[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(1): 7-16.]

[31] 刘小平, 董治宝. 湿沙的风蚀起动风速实验研究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(2): 1-4. [Liu Xiaoping, Dong Zhibao. Experimental study on wind erosion initiation of wet sand[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(2): 1-4.]

[32] 移小勇, 赵哈林, 赵学勇, 等. 不同风沙土含水量因子的抗风蚀性[J]. 土壤学报, 2006, 43(4): 684-687. [Yi Xiaoyong, Zhao Halin, Zhao Xueyong, et al. Erodibility of aeolian soils in moisture content[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(4): 684-687.]

[33] 闫德仁. 呼伦贝尔沙地[M].呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 2010. [Yan Deren. HulunBuir Sandy Land[M]. Hohht: Inner Mongolia University Press, 2010.]

[34] 张萍, 哈斯, 王帅, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑积沙区的植被分带性[J]. 自然资源学报, 2008, 23(2): 237-244. [Zhang Ping, Ha Si, Wang Shuai, et al. Zonation of vegetation on depositional area of blowout in HulunBuir Grassland[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(2): 237-244.]

[35] 林聪. 呼伦贝尔市近57年干燥度变化特征分析[J]. 新农业, 2020(22): 13-14. [Lin Cong. Characteristics of dryness change in Hulunbuir in recent 57 years[J]. New Agriculture, 2020(22): 13-14.]

[36] 王明莹. 呼伦贝尔天然草地野生菊科牧草资源及资源评价[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(4): 116-124. [Wang Mingying. Wild composite herbage resources and resource evaluation in HulunBuir natural grassland[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(4): 116-124.]

[37] 张惜伟, 汪季, 高永, 等. 近15年呼伦贝尔沙质草原植被覆盖变化对气候因子的响应[J]. 草地学报, 2018, 26(1): 62-69. [Zhang Xiwei, Wang Ji, Gao Yong, et al. Response of vegetation cover to climatic factors in HulunBuir Sandy in recent 15 years[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(1):62-69.]

[38] 张绍云, 董玉祥. 海岸沙地风蚀坑形态-动力学研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(10): 1028-1037. [Zhang Shaoyun, Dong Yuxiang. Research progress on morph dynamics of coastal sandy blowout[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(10): 1028-1037.]

[39] Hesp P A, Walker I J. Three-dimensional aeolian dynamics within a bowl blowout during offshore winds: Greenwich Dunes, Prince Edward Island,Canada[J]. Aeolian Research, 2011, 3: 389−399.

[40] 车雪华, 罗万银, 邵梅, 等. 青海共和盆地不同发育阶段风蚀坑表面气流场与形态反馈研究[J]. 地球科学进展, 2021, 36(1): 95−109. [Che Xuehua, Luo Wanyin, Shao Mei, et al. Form-flow feedback within blowouts at different developing stages in the Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(1): 95−109.]

[41] Wu Gaolin, Lui Yu, Yang Zheng, et al. Root channels to indicate the increase in soil matrix water infiltration capacity of arid reclaimed mine soils[J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 133−139.

[42] 张璐, 朱仲元 ,张圣微, 等. 半干旱草原型流域土壤水分变异及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 124−132. [Zhang Lu, Zhu Zhongyuan, Zhang Shengwei, et al. Analysis of soil moisture variation and its influencing factors in semi-arid steppe watershed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(13): 124−132.]

Heterogeneity of soil moisture of blowouts in HulunBuir grassland

YUAN Limin[1,2,3], YANG Zhiguo[1,4], XUE Bo[1,2], GAO Haiyan[1,3], HAN Zhaorigetu[5]

(1. Inner Mongolia Academy of Forestry, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Duolun Hunshandake Sand Ecosystem Research Station, Xilingol 027300, Inner Mongolia, China; 3. Inner Mongolia Key Laboratory of Desert Ecological System, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 4. Key Laboratory of State Forestry Administration on Sandy Land Biological Resources Conservation and Cultivation, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 5. Academy Institute of Forestry and Grassland of HulunBuir, HulunBuir 021008, Inner Mongolia, China)

Abstract: Blowout is an important manifestation of grassland desertification that is a common for a wind erosion landform in sandy grassland and is highly destructive to grassland vegetation. The blowouts that were in the active development stage of HulunBuir grassland were the object of this research, and the surrounding grassland was the control in which the soil moisture was measured in different locations and different depth. The results show the following: (1) Blowouts caused the “crevasse” effect of soil moisture in grassland that lead to a significant decrease in the soil of the surrounding grassland in a range of nearly 20 m. A close proximity to the pit results in lower soil moisture, A“dry zone”was formed in the range of 0−3 m at the edge of the pit, and the soil moisture was reduced by 45.15% compared with the control. (2) Soil moisture of the pit decreased by 44.44%, and no significant difference was observed in the soil moisture between the surrounding sand accumulation area and the lightly overlying sand area compared to the control. (3) There was a great difference in soil moisture of the pit in the soil layers and sand accumulation area. C_v could reach more than 50%. As soil depth increased, the soil moisture increased first and then decreased. (4) The sand accumulation area of blowouts could realize a certain“water storage”effect after the rainy season, the pit and edge zone had a serious“water loss”effect. The soil was extremely dry soil provided conditions for the expansion and morphological development of blowouts.

Keywords: blowout; soil erosion; soil moisture; space scale; HulunBuir grassland